

万颖君, 金鑫, 马光辉, 等. 软土地区施工现场重载车辆对基坑周围环境振动实测分析[J]. 华南地震, 2024, 44(2): 128–138. [WAN Yingjun, JIN Xin, MA Guanghui, et al. Measured Analysis of the Vibration of the Surrounding Environment of the Foundation Pit by Heavy-Duty Vehicles on the Construction Site in Soft Soil Area [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(2): 128–138]

软土地区施工现场重载车辆对基坑周围环境 振动实测分析

万颖君¹, 金鑫¹, 马光辉¹, 张振宇², 翟洪刚¹, 汤方程^{3, 4}, 孙苗苗^{3, 4}

(1. 杭州交通投资建设管理集团有限公司, 杭州 310000; 2. 杭州市交通投资集团有限公司, 杭州 310000; 3. 浙大城市学院土木工程系, 杭州 310015; 4. 城市基础设施智能化浙江省工程研究中心, 杭州 310015)

摘要: 以杭州某软土基坑为背景, 通过在基坑周边地表布置加速度传感器, 对重载车辆行驶引起的软土地区表层土体振动进行测试, 得到软土地区临时施工道路的振动响应。通过统计各测点的加速度平均峰值、加速度振级以及振动主频, 分析了软弱土体的振动响应, 获取不同车速、测点方位等对土体振动响应的影响, 根据重载车辆荷载对土体振动加速度以及振级随着离振源距离变化趋势最终划分基坑周围受重载车辆行驶振动的影响范围, 得到软土地区基坑安全施工的范围。通过本次对杭州某软土基坑周边振动测试有助于全面认识重载车辆行驶振动对土体振动的传播规律, 并对软土地区的基坑工程设计、安全施工及防灾减灾等提供依据。

关键词: 软土地区; 重载车辆荷载; 加速度; 振级; 振动主频

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)02-0128-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.02.15

Measured Analysis of the Vibration of the Surrounding Environment of the Foundation Pit by Heavy-Duty Vehicles on the Construction Site in Soft Soil Area

WAN Yingjun¹, JIN Xin¹, MA Guanghui¹, ZHANG Zhenyu², ZHAI Honggang¹,
TANG Fangcheng^{3, 4}, SUN Miaomiao^{3, 4}

(1. Hangzhou Communications Investment Construction Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
2. Hangzhou Communications Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. Department of Civil Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China; 4. Zhejiang Engineering Research Center of Intelligent Urban Infrastructure, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Taking a soft soil foundation pit in Hangzhou as the background, the vibration of surface soil in soft soil area caused by low-frequency heavy-duty vehicles was tested by arranging acceleration sensors on the surface around the foundation pit, and the vibration response of temporary construction road in soft soil area was obtained. By counting the average peak acceleration, acceleration vibration level and dominant frequency of vibration at each

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 浙江省交通运输厅科技项目(2022-GCKY-11); 浙江省自然科学基金项目(LTGC23E080002)联合资助。

作者简介: 万颖君(1976-), 女, 高级工程师, 主要从事基坑施工技术。

E-mail: sunmm@hzc.edu.cn

measuring point, the vibration response of soft soil was analyzed, and the influence of different vehicle speed and measuring point orientation on the vibration response of soil was obtained. According to the change trend of the acceleration and vibration level of the soil vibration caused by the heavy vehicle load with the distance from the vibration source, the influence range of heavy-duty vehicle driving vibration around the foundation pit was finally divided, and the safe construction range of foundation pit in soft soil area was obtained. The vibration test helps to fully understand the propagation law of heavy-duty vehicle vibration, and further provides basis for foundation pit engineering design, safe construction and disaster prevention and mitigation in soft soil area.

Keywords: Soft soil area; Heavy-duty vehicles; Acceleration; Vibration level; Dominant frequency of vibration

0 引言

伴随着我国城市化进程的不断加快,城市建筑逐渐向地下延伸,城市内有越来越多的地下基坑工程。在基坑工程的开挖过程中会对周边建筑产生安全影响,其中以重载车辆荷载为代表的交通荷载也是一个不可忽略的重要影响因素之一。

在理论方面,路面移动荷载作用下起步较晚,徐斌等^[1]根据 Biot 波动理论,采用传递、反射矩阵方法研究了移动荷载作用下层状饱和土动力响应问题。王立安等^[2]对非均匀饱和地基的动力特性做了研究。徐长节等^[3]和周凤玺等^[4-6]基于 Vardoulakis 等^[7]的理论研究了非饱和土中波的传播规律。李绍毅^[8]采用半解析法研究了移动荷载作用下多层非饱和和铁路地基的共振问题,分析了土体饱和度对非饱和地基振动的影响。Lu 等^[9]研究了矩形移动荷载作用下非饱和地基的动力响应。Fang 等^[10]研究了列车荷载作用下非饱和地基的振动响应。Song 等^[11]对埋置荷载作用下的非饱和地基动力响应问题做了研究。李冬发^[12]尝试模拟计算行驶中的车辆对路面的动态响应,研究了路面动态荷载响应问题。

国内基坑边坡稳定性的研究总体要晚于欧美国家,Turumen 等^[13]和 Klæboe 等^[14]通过对挪威大量地区邻近交通干线的建筑物现场测试,结果表明交通振动影响显著影响邻近建筑物的安全性和建筑物内人们的舒适度。上 60 年代后我国开始重视对滑坡现象的研究。马晓磊等^[15]以天津市 Z2 地铁为背景,依托实际工程参数展开数值分析,结果表明软土地区的浅隧道可能将严重影响邻近区域环境振动响应。马蒙等^[16]通过典型案例对比分析地铁与地面交通对古建筑的影响,建议交通减振应同时考虑地面交通与轨道交通。宗琳等^[17]通过现场实测,采集了城市轨道交通车站附近大型建筑的振动响应数据,对结构动力响应进行了研究。

孙晓静等^[18]结合北京地铁规划通过北京大学西门的工程案例,指出地铁运行引发邻近区域建筑物沉降,甚至有损坏的风险。巴振宁等^[19]基于天津地铁 5 号线的工程背景进行研究,结果表明距隧道中心线 0~40 m 的场地振级较大,10~100 m 距离内竖向振动强度衰减明显。郑国琛等^[20]针对某城市地铁沿线进行理论预测,结果表明沿线场地在一定范围内可能超越环境振动限值,需采取振动控制措施。李绍毅^[21]采用半解析法研究了移动荷载作用下多层非饱和土和铁路地基的共振问题,分析了土体饱和度对非饱和地基振动的影响,发现土体饱和度变化对振动位移的影响规律,与地基分层、荷载速度和频率有关。

上述土体模型多采用弹性或粘弹性理论,由于地处软土地区的基坑,多涉及到的土体为饱和土体,目前已有的研究缺少饱和土体的相关内容,故有必要针对软土地区的基坑围护周边地基振动进行研究。而现场实测可以真实了解现场的振动规律,并为缺少理论分析和数值模拟提供验证依据,在实际中常被采用。

现场实测作为一种了解振动的重要手段被广泛采用。尽管对交通荷载引起的环境振动有诸多现场测试,但这些测试大多以地铁为主,且保护对象多为振源附近的建筑物,少有对车辆荷载为振源的研究,因而无法有效判断车载振动对基坑稳定性的影响。基于此,以杭州某软土基坑为例,对软土地区重载车辆进行振动全过程测试,分析不同车速、测点方位等对土体振动的影响,尤其是在软土地区的传播规律。

1 现场实测简介

1.1 测点布置

为测试以低频为主的重载车辆行驶引起的软土地区的表层土体振动及软土地区临时施工道路

的振动响应，现以杭州某软土深基坑为背景，通过对现场真实车流过程中的车辆荷载的全过程监测，得到车辆荷载作用下基坑支护结构土压力及振动加速度特性随时间空间的变化衰减规律。

按照车辆的车轴数量进行分类，我国高等级公路上常见的各轴型重载车辆主要包括三轴重载车(前桥是1型轴，后桥是5型轴)、四轴重载车(前桥是1型轴，中桥是1型轴，后桥是5型轴)、五轴半挂车(牵引车前桥是1型轴，牵引车后桥是5型轴，拖挂车是5型轴)等。施工现场多为四轴重载车和五轴半挂。

基坑位于杭州市某经济开发区，周围主路段为杭州市南北向交通道路，车流量较大，交通繁忙，地下各类管线众多，错综复杂，且一般为主干管，对勘察、设计、施工影响较大。该基坑为3#基坑，桩号由K1+075~K1+059.5，全长84.5 m，

宽30 m，开挖深度达到15.910~16.855 m，采用800 mm厚地下连续墙加内支撑体系，其中第一道支撑采用钢筋混凝土支撑，设置2~3道钢支撑+临时支柱的围护形式，属于一级基坑等级。

基坑周围土层从上至下依次为：①素填土；②粉质黏土；③粉土；④淤泥质黏土；⑤粉质粘土；⑥粉质黏土夹粉土，具体土层参数如下表1。其中在地表布置加速度传感器，测点都位于临时道路的同一侧，地表布置的加速度计，测点按A1~C5采取3×5阵列、D1~F6和G1~I6 6×3阵列布置，其采样频率为100 Hz。其横向间距7 m，纵向间距7 m，布置范围从临时道路边缘一直到基坑边缘4 m左右。

测试区段场地开阔，远离市中心，周围有在建基坑，距离基坑30 m左右，忽略建筑物对现场振动测试的影响，现场平面图如图1、图2所示。

表1 土层参数表

Table 1 Soil strata parameters

土层编号	土体名称	平均厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	素填土	1.75	18.8	0.86	12.6	8.1
2	粉质黏土	2.20	18.7	0.88	18.3	11.9
3	粉土	1.35	18.9	0.78	16.0	27.8
4	淤泥质黏土	7.55	16.9	1.32	11.2	6.1
5	粉质黏土	2.20	18.3	0.95	14.8	10.5
6	粉质黏土夹粉土	3.50	17.4	0.98	12.9	8.7



图1 测点布置图

Fig.1 Monitoring point layout

1.2 振动评价标准

由于重载车辆振动的频率范围较宽，不能只考虑加速度峰值，应对其整个过程进行评价。根据《工程振动术语和符号标准》(GBT 51306-2018)，采用振动加速度级评价重载车辆行驶引起的振动，振动加速度级的计算公式如下：

$$I = 20 \log \frac{a_e}{a_{ref}} \tag{1}$$

式(1)中： a_e 为不同频率下计权修正后得到振动加速度有效值，计算公式如下

$$a_e = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 10^{\frac{C_i}{10}}} \tag{2}$$

式(2)中： a_i 为第*i*个中心频率下的加速度有效值； C_i 为第*i*个中心频率对应的计权修正值，当不需考虑计权修正时， C_i 为零； a_{ref} 为基准加速度， 10^{-6} m/s²。

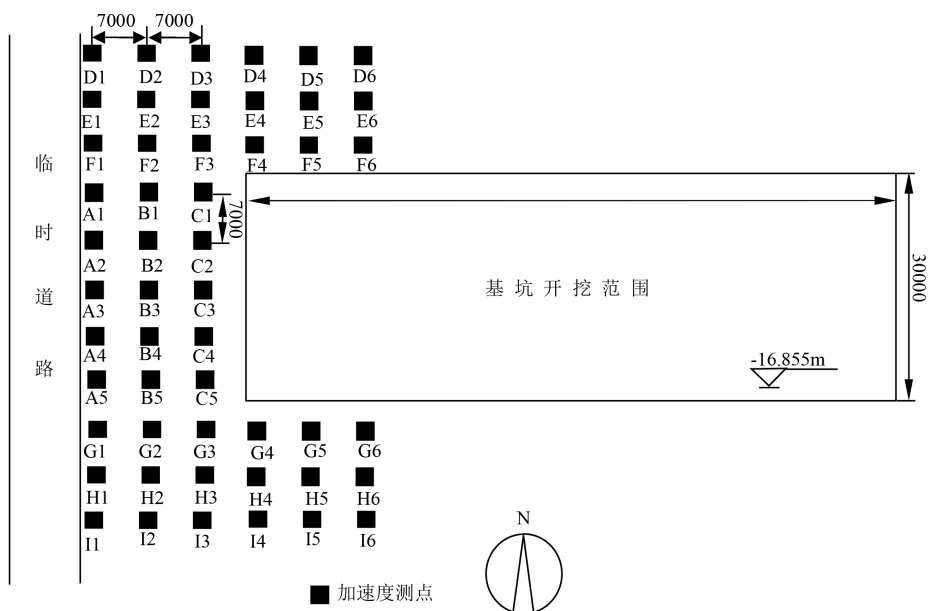


图2 施工场地测点平面布置图

Fig.2 Layout of monitoring points on construction site

上述振动加速度有效值即为加速度均方根值,按下式计算:

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{T} \left(\int_0^T a^2 dt \right)} \quad (3)$$

式(3)中: T 为时长, 单位为 s; a 为任一时刻的加速度, 单位为 m/s^2 。

对于离散的加速度时程数据, 则用频域幅值谱各离散频率的加速度有效值计算, 即采用第 i 个中心频率所在的频带内 m 个离散点的加速度值求得:

$$a_i = \sqrt{\frac{1}{m} (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_m^2)} \quad (4)$$

2 振动实测结果

测试地段位于杭州某软土地区, 与普通道路不同的是, 该道路为临时的施工便道, 通常只简单地铺设了水泥面板, 下部多为有缺陷的地基。当主频处于中低频范围的重载车辆经过软土地区的基坑周边时, 由于软土灵敏度高, 触变性强的特点, 振动将更加剧烈, 这将对基坑稳定性产生较大影响。通过多次测量加速度数据的峰值及其振级, 最后得到每个测点的加速度平均峰值和振级, 同时对加速度时程数据进行频谱分析。

其中, 振级的时程数据可以通过每个测点所测得的加速度时程曲线根据振动加速度级的计算公式(1)求得重载车辆相对应时间内的各测点的振级。

2.1 地表土体振动规律

在本研究中, 主要关注测点 A、测点 B、测点 C 系列的动力响应, 其加速度分别表示为 a_1 、 a_2 、 a_3 ; 对应的振级分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 。

测点 A、B、C 的加速度平均峰值与振级如下图 3, 数据如下表 3 所示。车载振动属于交通振动, 并且施工区域距离居民区较远, 故不需要考虑人体的感受, 这里不对其振级计权考虑。可以从加速度统计结果看出, 车载振动从测点 A 至测点 C, 随着距离重载车辆作用点距离的增大, 振动加速度幅值的大小逐渐减小, 说明车辆荷载距离基坑越近, 其对基坑的影响越显著。单车加速度从 A 点的 $1.225 m/s^2$ 降至 $0.189 m/s^2$, 两者相差极大, 加速度衰减高达 85%。但双车辆与多车辆分别从 $0.694 m/s^2$ 和 $0.464 m/s^2$ 变化为 $0.258 m/s^2$ 和 $0.282 m/s^2$, 降为原本的 37% 和 61%, 相较单车加速度衰减较少。经过车辆不同, 产生的加速度也不同。单车引起的土体振动较多车辆的更为剧烈, 加速度较振级急剧减少, 测点 A 单车加速度 $1.225 m/s^2$, 双车辆为 $0.694 m/s^2$, 多车辆仅为 $0.464 m/s^2$, 分别为单车加速度的 57% 和 38%。同时, 单车、双车辆和多车辆分别为 121.76 dB、115.53 dB 和 113.49 dB, 分别占单车的 95% 和 93%, 不同车辆类型的加速度振级只有轻微减少。土体振动加速度与车速相关, 多车辆经过时行驶速度较慢, 车辆荷载较大, 故多车辆的加速度比单车小很

多,但振级相差不大。选择其中有代表性加速度实测数据,单车辆、双车辆、多车辆在测点 A、B、C 的土体振动加速度时程如下图 4 所示。

根据表层土体中布置的测点的加速度平均峰值及计权及速度振级(土体振动属于环境,采用计权),绘制出基坑周围土体加速度和加速度振级的等值线,如图 5、图 6 所示。土体的加速度呈曲线形向基坑方向衰减,且形状大致相同,距离道路近等值线密集;靠近基坑时等值线稀疏。在测验范围内加速度幅值在 0.2~1.4 m/s²,加速度振级范围在 105~125 dB,最大值在道路附近,加速度振幅基本随着离道路距离增加而衰减,局部有放大效应。在离道路 5 m 范围内,加速度振级在 116~120 dB,距离道路 15 m 时,加速度振级可降至 105 dB。并且单车辆与多车辆的加速度和振级略大于双车辆,而多车辆的衰减更为剧烈,加速度从 1.3 m/s²降至 0.2 m/s²,而单车辆和双车辆分别从 1.4 m/s²降至 0.6 m/s²,和 0.9 m/s²降至 0.2 m/s²。

从以上分析不难看出,在重载车辆荷载作用下无论是土体的加速度还是土体的振动级都会随着随着离道路距离的增大而减小,其原因可能在于能量经过多次反射和散射,使得振动能量逐渐分散和吸收,导致衰减趋势减缓。并且在单车辆荷载作用下土体的加速度以及振动级变化尤为明显,其可能的原因在于土体这种情况下所受荷载的作用点相对较集中,从而可能导致振动效应更加明显,进一步的导致基坑附近会更容易受到单个车辆荷载的直接影响,因此对土体加速度和振动影响可能较大,并且无论是双车辆还是多车辆荷载产生的振动都可能会影响振动的传播和共振现象,并且在一些情况下,单车辆荷载的频率可能会更接近地面或结构的共振频率,从而引起更大的振动影响,这也是在单车辆荷载作用下土体的加速度以及振动级变化相比起其它车辆荷载作用下变化更加明显的原因之一。

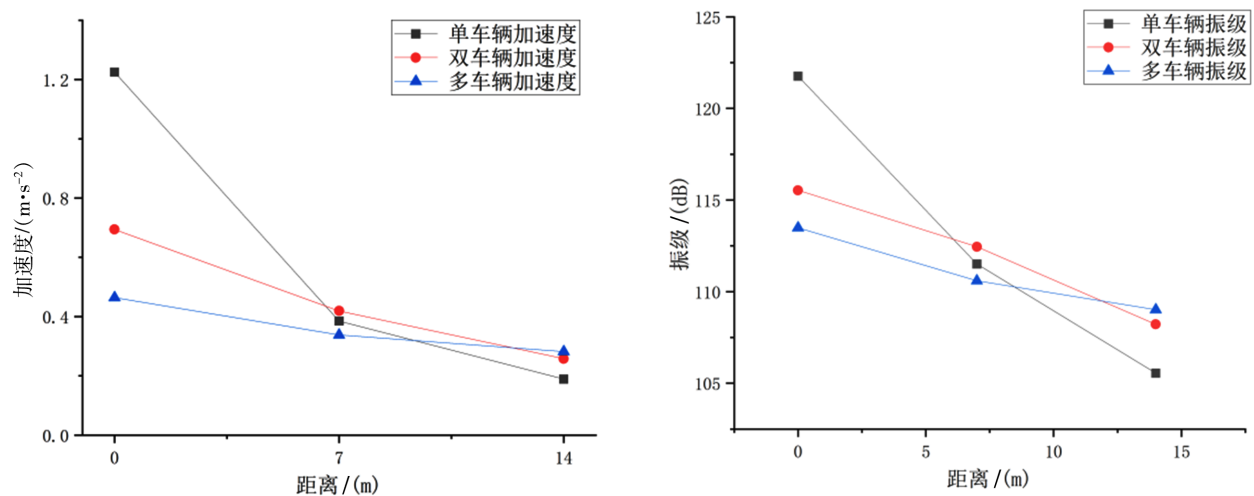


图 3 加速度、振级折线

Fig.3 Line graph of acceleration and vibration level

表 2 测点加速度平均峰值及振级

Table 2 Average peak acceleration and vibration level at monitoring points

测点	加速度/(m·s ⁻²)			振级/dB		
	单车辆 a ₁	双车辆 a ₂	多车辆 a ₃	单车辆 I ₁	双车辆 I ₂	多车辆 I ₃
A	1.225	0.694	0.464	121.76	115.53	113.49
B	0.385	0.419	0.338	111.51	112.45	110.59
C	0.189	0.258	0.282	105.55	108.22	109.02

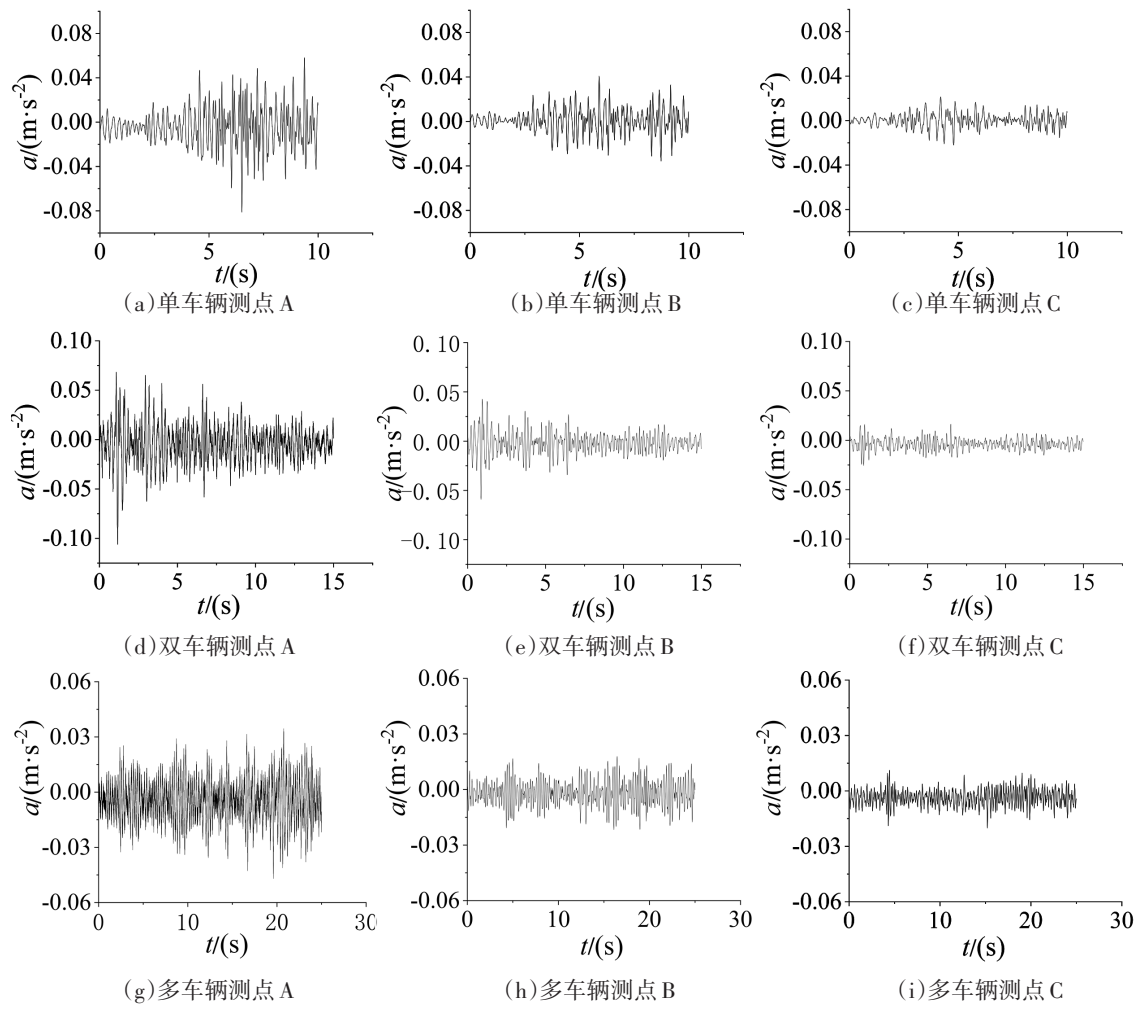


图4 表层土体加速度时程曲线

Fig.4 Acceleration time-history curves of surface soil

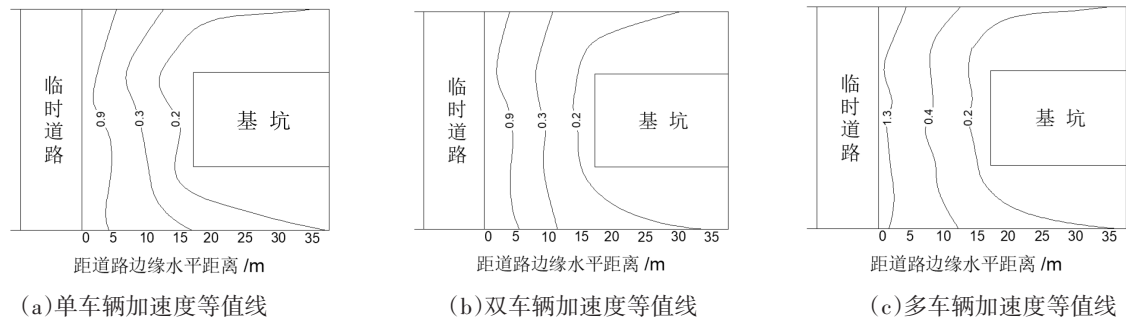


图5 周围地层加速度等值线

Fig.5 Acceleration contours of surrounding soil

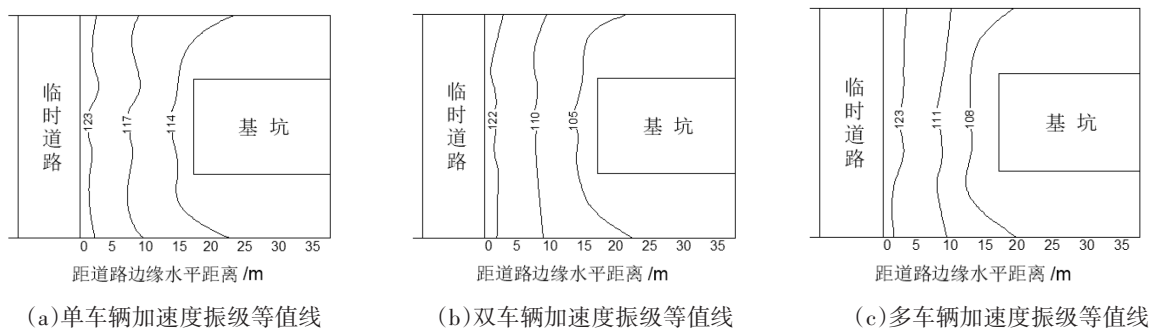


图6 周围地层加速度振级等值线

Fig.6 Acceleration vibration level contours of surrounding soil

2.2 地表土体频率特征

对同一时段、不同测点的加速度时程曲线进行频谱分析,得到车载振动传播过程中的振动频率特征,频谱曲线如图7所示。

从图中不难看出,在相同时间段内,车辆荷载对土体振动所产生的能量在从测点A到测点C逐渐衰减。这种衰减趋势可能指示着一种特定的振动传播机制或土体的吸收特性,即随着离道路距离的增大,土体中所存在的能量在逐渐的减小,并且会对基坑影响的可能性就越小,这种衰减现象可能是因

为土体的吸收能力以及传播路径的复杂性所致。在分析曲线中的车载振动主频范围时,可以明显地捕捉到主频的分布情况,其主频位于0~10 Hz之间,不难推断车辆荷载对土体产生的荷载属于低频荷载,即能量主要集中在低频范围内,其影响的因素有很多,但通常与车辆的振动特性和路面不平度有关。

由于在该土体工况下可能存在一种远离振动源的衰减效应,所以对研究不同土体类型对振动传播的不同响应也有着重要的参考价值。

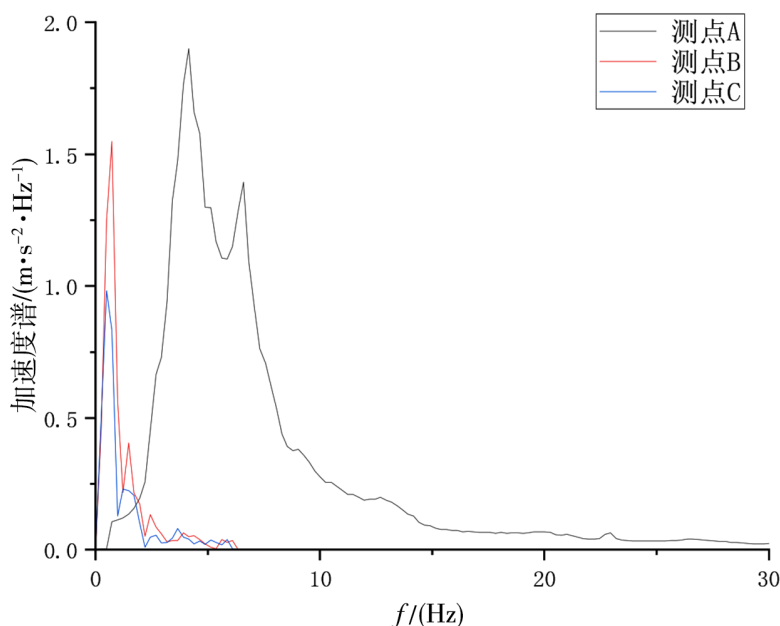


图7 加速度频谱曲线

Fig.7 Acceleration spectra curves

2.3 施工影响区域

为保证基坑的安全施工,不能仅考虑基坑施工的影响,也要考虑重载车辆造成的振动影响。参考2021年施行的《工业建筑振动控制设计标准》(GB 50190-2020),按评价指标取加速度的最大值,工业建筑采用天然地基时,黏土的容许振动加速度为1.5 m/s²,砂土的容许振动加速度为1.0 m/s²。

根据上文图5的周围地层加速度等值线可知:一般情况加速度幅值均不大于1.5 m/s²,且距离道路边缘0.6 h(≈11 m),加速度幅值均小于1.0 m/s²,

加速度振级不大于115 dB,符合相关规范要求。基坑西侧加速度等高线较为密集,南北两侧的加速度幅值较小,交通荷载作用下基坑开挖处于较为安全的范围。因此,可使用基坑深度 h 来划定一般影响区和较小影响区的范围。如下图8所示,本项目在距离振源11 m(0.6 h)范围内为一般影响区,在此范围之外为较小影响区,故可按距离振源0.6 h 范围为一般影响区进行交通荷载及流量控制;此外,为减少或避免风险,建议在基坑开挖时做好较小影响区域内诸如架设支架、排水等临时防护措施以保证基坑工程的顺利施工。

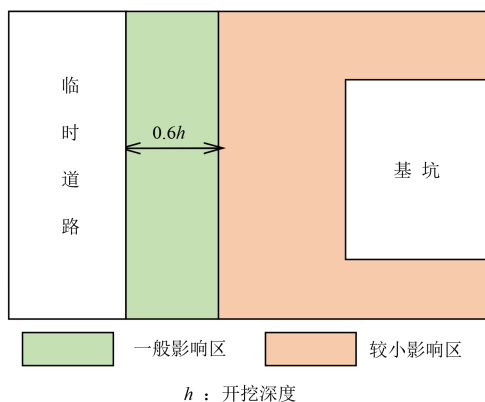


图8 施工影响区

Fig.8 Construction impact zone

3 结论

本文通过对杭州某软土地区施工现场的重载车辆的现场实测，讨论了不同类型的重载车辆在不同情况下的加速度幅值、加速度振级的衰减规律及地表土体的频域特性，得到了以下主要结论：

(1)重载车辆引发的土体振动加速度的衰减趋势是随着距离的增加而呈现先迅速后平缓的减小规律，而加速度振级整体衰减较少其原因可能在于能量经过多次反射和散射，使得振动能量逐渐分散和吸收，导致衰减趋势减缓。

(2)单车经过时引起的土体振动最剧烈，但会发生极大地衰减，加速度下降高达85%；双车辆和多车辆的加速度幅值衰减较为缓慢，分别为62%和39%，其可能的原因在于土体这种情况下所受荷载的作用点相对较集中。

(3)重载车辆的振动频率较窄，并且引发土体振动的荷载以低频荷载为主，其主频在0~10 Hz之间，所产生的能量会随着距离的增大而迅速衰减。

(4)根据重载车辆所引起的土体振动加速度以及振级会随着离振源距离增大衰减的趋势，可以通过使用基坑深度 h 来划定对土体影响区范围进行交通荷载及流量控制以及对基坑位置的选取。

参考文献

- [1] 徐斌,陆建飞,王建华,等.移动荷载作用下层状饱和土的动力响应[J].岩土力学,2008,29(12):3186-3192.
- [2] 王立安,赵建昌,余云燕.瑞利波在非均匀饱和地基中的传播特性[J].岩土力学,2020,41(6):1983-1990,2000.
- [3] 徐长节,徐良英,杨园野.三相非饱和土参数对波的传播的影响研究[J].岩土力学,2015,36(S2):340-344.
- [4] 周凤玺,柳鸿博.非饱和土中 Rayleigh 波的传播特性分析[J].岩土力学,2019,40(8):3218-3273.

- [5] 周凤玺,赖远明,米海珍,等.非均匀地基与均匀地基解答之间的相似关系[J].非均匀地基,2013,34(12):3372-3376.
- [6] 周凤玺,曹永春,赵王刚,等.移动荷载作用下非均匀地基的动力响应分析[J].非均匀地基,2015,36(7):2026-2033.
- [7] Vardoulakis I, Beskos DE. Dynamic behavior of nearly saturated porous media[J]. Mechanics of Materials, 1986, 5(1):87-108.
- [8] 李绍毅.土体饱和度对移动荷载引起多层非饱和铁路地基振动的影响[J].岩土力学,2021,42(1):151-159,167.
- [9] Lu Z, Fang R, Yao H L, et al. Dynamic responses of unsaturated half-space soil to a moving harmonic rectangular load[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(9):1057-1077.
- [10] Fang R, Lu Z, Yao H L, et al. Study on dynamic responses of unsaturated railway subgrade subjected to moving train load [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018(115):319-323.
- [11] Song W, Zou D J, Liu T J, et al. Dynamic response of unsaturated full-space caused by a circular tunnel subjected to a vertical harmonic point load[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020(130):106005.
- [12] 李冬发.半刚性路面动态荷载响应的分析研究[J].道路与水路运输,2009,32(1):1-99.
- [13] Turumen R, Brekke A, Harvik L, et al. Vibration in dwellings from road and rail traffic—Part I :a new Norwegian measurement standard I and classification system [J]. Applied Acoustics, 2003, 64(1):71-87.
- [14] Klæboe R, Turumen R, Harvik L, et al. Vibration in dwellings from road and rail traffic—Part II :exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models [J]. Applied Acoustics, 2003, 64(1):89-109.
- [15] 马晓磊,巴振宁,高愈辉,等.滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J].岩土工程学报,2019,41(S2):177-180.
- [16] 马蒙,刘维宁.我国文物建筑受列车微振动影响研究现状及关键问题分析[J].噪声与振动控制,2019,39(4):1-6.
- [17] 宗琳.地铁运行引起的建筑结构振动响应分析[D].广州:华南理工大学,2014.
- [18] 孙晓静,袁杨,马蒙,等.地铁列车运行引起远场低频振动响应预测研究[J].振动与冲击,2017,36(4):198-202.
- [19] 巴振宁,高愈辉,梁建文,等.汽车所致虎门遗址振动全过程性能化研究[J].振动与冲击,2014,33(14):95-100.
- [20] 郑国琛,祁皓.基于某城市地铁激励的邻近建筑物振动响应预测[J].铁道工程学报,2017,34(3):68-73.
- [21] 李绍毅.土体饱和度对移动荷载引起多层非饱和铁路地基振动的影响[J].非饱和铁路地基,2021,42(1):151-159.